نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۰۰-۱۸۷

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 187-200

مدل‌سازی و بهینه‌سازی فرآیند آسیاب کردن غلات برای تولید خوراک طیور در آسیاب چکشی با استفاده از روش سطح پاسخ

زانیار زیباهوش[۱]، جلال خدائی[۲]*، سمیرا زارعی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۰۳

چکیده

از آنجا که خوراک طیور بخش بزرگی از هزینه‌های صنعت پرورش طیور را به خود اختصاص می‌دهد، می‌تواند عامل بسیار مهمی در میزان سود و زیان مرغداری‌ها باشد. بهینه‌سازی عملکرد دستگاه آسیاب چکشی برای کاهش اندازه مواد مختلف برای تولید خوراک طیور، می‌تواند در به‌کارگیری راه‌های مناسب و بهینه و در نهایت حصول مواد خوراکی با حداقل هزینه، حداکثر کیفیت و ظرفیت بسیار حائز اهمیت باشد. برای ارزیابی عملکرد دستگاه از نظر میزان درجه‌ی ریزی خوراک و ظرفیت کاری آسیاب، چهار محصول گندم، ذرت، سویا و جو در سه سطح اندازه سوراخ غربال (۲، ۳/۲ و ۴/۴ mm)، رطوبت دانه (۱۰، ۱۴و ۱۸ درصد)، نرخ تغذیه (یک سوم، دو سوم و باز بودن کامل دریچه مخزن) و تعداد چکش (۱۲، ۱۸ و ۲۴ عدد) به‌وسیله آسیاب خرد شد و در هر مورد درجه‌ی ریزی و ظرفیت کاری به‌صورت مجزا دسته‌بندی شد. روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی به‌منظور تعیین نقاط بهینه‌ی دستگاه در فرآیند آسیاب کردن برای دست‌یابی به بیشترین میزان خردشدگی محصول و بیشترین ظرفیت کاری آسیاب استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نقاط بهینه‌ی ۳/۲ mm برای قطر سوراخ غربال، رطوبت دانه ۱۰ درصد، نرخ تغذیه ۳۴۳/۸ $g\ s^{-1}$ و تعداد ۱۸ عدد چکش برای گندم، حداقل درجه‌ی ریزی (بیشتر خرد شدن) به مقدار ۳/۴۲ mm را در بین محصولات داشته است. هم‌چنین بیشترین ظرفیت کاری آسیاب (۴۵/۱۲ $g\ s^{-1}$) برای ذرت در نقاط بهینه‌ی ۲ mm سوراخ غربال، رطوبت ۱۰درصد دانه، نرخ تغذیه ۴۳۳/۸ $g\ s^{-1}$ و تعداد چکش ۲۴ عدد به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: آسیاب چکشی، آسیاب کردن، بهینه‌سازی، درجه‌ی ریزی، ظرفیت کاری

مقدمه

با توجه به آمارهای مصرف خوراک دام خرد و مخلوط شده از قبیل ذرت، یولاف، جو، گندم و چاودار می‌توان به ضرورت و اهمیت بررسی روش‌های مختلف تهیه خوراک دام پی برد. امروزه باتوجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در بخش‌های کشاورزی و دامپروری، روش‌های قدیمی در این بخش‌ها منسوخ شده و لزوم استفاده از روش‌های مکانیزه و جدید جهت کاهش تلفات، افزایش بازده، کاهش زمان و هزینه در هریک از این بخش‌ها امری مهم و ضروری به‌شمار می‌رود. یکی از راه‌های فرآوری غلات جهت استفاده به‌عنوان خوراک دام و طیور، کاهش اندازه ذرات است که علاوه بر بهبود راندمان مخلوط کردن، ارزش تغذیه‌ی خوراک و کیفیت خوراک پلت شده را بهبود خواهد داد (Kiani, 2006). از جمله راه‌کارهای کاهش اندازه ذرات، استفاده از انواع آسیاب‌ها است. نرم شدن بیش از حد مواد، علاوه بر هدر رفت انرژی الکتریکی، موجب ساییدگی دستگاه و مشکلات گوارشی در دام و طیور می‌گردد. آسیاب کردن و نرم نمودن مواد خوراکی، توسط آسیاب صورت می‌گیرد. آشنایی با ساختمان و نحوه کار با آنها می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید (به جهت انجام کار صحیح با آنها) در اعمال مدیریت خوب در گاوداری‌ها و مرغداری‌ها که بخشی از آن شامل تولید جیره متعادل، یکنواخت و ارزان قیمت می‌باشد، کمک به‌سزایی نماید. بسیاری از روش‌های عمل‌آوری، مانند آسیاب کردن و یا غلتک زدن، ارزش غذایی[۳] را بین ۵ تا ۱۵درصد و یا بیشتر افزایش می‌دهند (Pishkar, 2000).

فاکتورهایی مانند میزان رطوبت دانه غلات، وضعیت چکش‌ها یا توری‌ها یا وضعیت شیار غلتک‌ها به‌طور عمده از عوامل ایجاد اختلاف در اندازه‌ی نهایی مواد آسیاب شده می‌باشند. بنابراین می‌توان با بررسی پارامترهای قابل تنظیم در دستگاه‌های تولید خوراک و تعیین مقادیر بهینه هر پارامتر، گامی در بهبود عملکرد، پیش‌بینی کار دستگاه و کنترل کیفیت دانه خرد شده برداشت. بهترین مقیاس اندازه‌گیری خوراک تولید شده با استفاده از آنالیز الک سنجیده می‌شود که به صورت میانگین اندازه ذرات یا درصد آن یا با استفاده از تست عبور مواد از الک‌های مختلف به‌دست می‌آید. آنالیز کامل الک نه تنها میانگین اندازه ذرات را مشخص می‌کند، بلکه چگونگی توزیع، مانند

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: j.khodaei@uok.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v10i2.72568

3- Nutritional value

مواد بیش از اندازه ریز یا بیش از حد درشت را نشان می‌دهد (Kermanshahi *et al.*, 2014). میزان ریزی مواد توسط دو فاکتور مدول ریزی[1] (قدرمطلق ریزی) که معرف ریزی مواد آسیاب شده است و مدول یکنواختی[2] (ضریب یکنواختی) که معرف بخش مواد درشت، متوسط و ریز خوراک می‌باشند (به‌صورت یک نسبت از کل مواد خرد شده)، مشخص می‌شود (Pourazarang and Ziaulhagh, 2002).

Islam (1988) یک آسیاب چکشی کوچک تجاری را برای آزمایش‌های آسیاب کردن در شرایط مختلف سرعت‌های آسیاب، اندازه غربال و محتوای رطوبت دانه، به‌منظور بررسی اثر پارامترهای ماشین و دانه، روی توزیع اندازه و انرژی مورد نیاز آسیاب کردن، مورد استفاده قرار داد. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که توزیع اندازه ذرات به شدت تحت تاثیر اندازه غربال آسیاب چکشی بود، اما رطوبت دانه و بار آسیاب اثر کمی داشتند. انرژی ویژه مورد نیاز با کاهش اندازه غربال آسیاب چکشی و افزایش رطوبت دانه افزایش یافت. Ghorbani *et al.* (2010) طی پژوهش خود انرژی مصرفی برای آسیاب کردن یونجه در اندازه‌های ۱۲، ۱۵ و ۱۸ mm را از چهار اندازه الک و آسیاب چکشی با قدرت ۱/۱ kW به‌دست آوردند، که نتایج به‌دست آمده حاکی از آن بود که یونجه با اندازه‌های ۱۸ و ۱۲ mm به‌ترتیب بالاترین (۳۰/۹۶kJ kg^{-1}) و کمترین (۵/۰۶kJ kg^{-1}) انرژی مصرفی لازم را داشتند. Al-Rabadi (2013) تاثیر دو سطح اندازه غربال آسیاب چکشی را روی پردازش پارامترها از جمله تولید خروجی، انرژی مصرفی، میانگین اندازه ذرات، انحراف معیار هندسی[3] مورد بررسی قرار داد. نتایج تحقیق او نشان داد که افزایش اندازه غربال آسیاب چکشی اثر معنی‌داری بر تولید خروجی، انرژی مصرفی و میانگین اندازه ذرات داشته اما هیچ تاثیری روی انحراف معیار ندارد. Dabbour *et al.* (2015) با به‌کارگیری دو پارامتر رطوبت دانه و اندازه قطر سوراخ غربال، به بهینه‌سازی پارامترهای آسیاب چکشی ازجمله عملکرد آسیاب کردن، انرژی مصرفی، انرژی تراکم و شاخص آسیاب کردن بر روی کیفیت ذرت برای پردازش کردن خوراک پرداختند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که عملکرد آسیاب کردن، انرژی مصرفی، انرژی تراکم و شاخص آسیاب کردن به‌ترتیب بین دامنه‌های (g h^{-1}) ۰/۷-۶/۸۳، (kJ kg^{-1}) ۳/۳۸-۳۲/۷۲، (J m^{-3}) ۱/۹۹-۱۸/۸۲ و (kJ mm kg^{-1}) ۱۲/۳۵-۹۱/۲۸ متغیر بوده است. El Shal *et al.* (2010) در تحقیق خود، به بررسی تاثیر پارامترهای عملیاتی بر عملکرد آسیاب چکشی مانند سرعت دورانی، رطوبت دانه، ضخامت چکش و سوراخ غربال و هم‌چنین بهینه‌سازی کار دستگاه پرداختند. نتایج به‌دست آمده منجر به این پیشنهاد گردید که از آسیاب چکشی در سرعت دورانی ۲۲۵۰ rpm (۳۳/۵۶ m s^{-1})، رطوبت دانه ۱۰ درصد، سوراخ غربال و ضخامت چکش ۵ mm برای تولید خوراک پلت شده با هدف افزایش مقدار ذرت ریز آسیاب شده و کاهش ذرت درشت آسیاب شده استفاده شود. Tumuluru *et al.* (2014) انرژی لازم برای آسیاب‌کردن و خواص فیزیکی گندم، کلزا، یولاف و کلش جو خرد شده را در دو مرحله خردکننده بدون غربال (تکه تکه شده) و استفاده از آسیاب چکشی با سه اندازه غربال محاسبه نمودند. بیشترین میانگین قطر متوسط برای گندم خرد شده و کمترین مقدار برای کلزای آسیاب شده به‌دست آمد. Bitra *et al.* (2009b) انرژی مکانیکی برای کاهش اندازه ذرات را به‌صورت مستقیم برای یونجه، کاه گندم و ذرت در یک آسیاب چکشی اندازه‌گیری کردند. این محققین انرژی مصرفی ورودی را برای سرعت‌های عملیاتی مختلف آسیاب چکشی از ۲۰۰۰ تا ۳۶۰۰ rpm، اندازه غربال ۳/۲ mm و مقدار ورودی توده ۲/۵ kg min^{-1} با لبه چکش‌های ۳۰ و ۹۰ درجه مشخص کردند. آن‌ها دریافتند که انرژی ویژه کل برای آسیاب کردن یونجه، کاه گندم و ذرت برای هر دو چکش ۳۰ و ۹۰ درجه افزایش می‌یابد.

در این پژوهش به دلیل محدودیت روش‌های تحلیل آماری مرسوم، در بحث انتخاب بهینه ورودی‌های مدل، روش سطح پاسخ مورد استفاده قرار داده شده است. در واقع روش سطح پاسخ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف در طرح‌های روش سطح پاسخ، بهینه‌سازی پاسخ (متغیر خروجی) است، که متأثر از چندین متغیر مستقل (متغیرهای ورودی) می‌باشد. با کمک این طرح آماری، تعداد آزمایش‌ها کاهش یافته و کلیه‌ی ضرایب الگوی رگرسیون درجه دوم و اثر متقابل شاخص‌ها، قابل برآورد هستند (Ghasemi *et al.*, 2015). طرح مرکب مرکزی[4] (CCD)، باکس بنکن[5] و دهلرت[6] سه روش اصلی طراحی سطح پاسخ می‌باشند که در این بین روش مرکب مرکزی از اعتبار بیشتری برخوردار است (Giri and Prasad, 2007). مزیت استفاده از روش مرکب مرکزی نسبت به آزمایش فاکتوریل، امکان استخراج اطلاعات بیشتر از تحلیل این طرح و تعداد کمتر تیمار و تکرارهای مورد نیاز جهت انجام آزمایش می‌باشد که اجرای این طرح را آسان‌تر می‌کند، همچنین امکان تعیین ترکیب‌های مختلف متغیر مستقل را در آزمایش فراهم می‌آورد (Aslan, 2007).

هدف از این پژوهش، بهینه‌سازی فرآیند آسیاب کردن محصولات گندم، ذرت، سویا و جو برای تولید خوراک طیور به روش سطح پاسخ از طریق بررسی تاثیرات پارامترهای قابل تنظیم در آسیاب چکشی مانند اندازه سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش بر میزان درجه‌ی ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی می‌باشد. تفاوت

1- Fineness moduls
2- Uniformity moduls
3- Geometric standard deviation

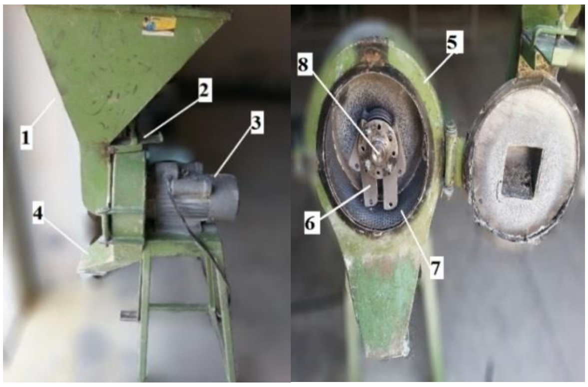
4- Central composite design
5- Box-Behnken
6- Doehlert

عمده آسیاب چکشی مورد بررسی در مطالعه حاضر با موارد بررسی شده در مطالعات قبلی در شکل چکش‌ها و الگوی قرارگیری آن‌ها است. همچنین روش آماری مورد استفاده در مطالعه حاضر یعنی روش سطح پاسخ، قابلیت مدل‌سازی دقیق پارامترها و نیز ارائه مقادیر بهینه پارامترها را نسبت به سایر روش‌های متداول آماری دارد.

مواد و روش‌ها

نحوه انجام آزمایشات

دانه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها عبارتند از: گندم (رقم آذر۲)، ذرت (رقم برزیلی)، سویا (دان پارس) و جو (رقم ارس). در این پژوهش، برای انجام آزمایش‌ها از یک آسیاب چکشی آزمایشگاهی مطابق شکل ۱ استفاده شد. ابعاد کلی دستگاه و مشخصات فنی مربوط به آن در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱– دستگاه آسیاب چکشی شامل: ۱. مخزن بذر (تغذیه‌کننده[1])، ۲. دریچه زیر مخزن، ۳. موتور الکتریکی، ۴. خروجی آسیاب، ۵. محفظه آسیاب، ۶. چکش[2]ها، ۷. الک[3] (غربال) و ۸. محور اصلی آسیاب

Fig. 1. Hammer mill machine including 1. Feeder tank, 2. Gate under the feeder, 3. Electrical motor, 4. The outlet of the mill, 5. Mill compartment, 6. Hammer, 7. Sieve and 8. Main shaft of the mill

تیمارهای اندازه قطر سوراخ‌های غربال (۲، ۳/۲ و ۴/۴ mm)، میزان رطوبت دانه (۱۰، ۱۴ و ۱۸ درصد) ، میزان ورودی دانه به محفظه آسیاب (یک سوم، دو سوم و کاملاً باز بودن دریچه مخزن) و تعداد چکش‌ها (۱۲، ۱۸ و ۲۴) برای اندازه‌گیری و ثبت خروجی‌ها (میزان درجه‌ی ریزی و ظرفیت کاری) مورد بررسی قرار داده شدند. برای اندازه‌گیری رطوبت دانه، از دستگاه رطوبت‌سنج غلات مدل MC-7821 استفاده شد. در زیر مخزن آسیاب چکشی یک دریچه کشویی برای تنظیم میزان ریزش بذر وجود دارد که در سه حالت یک سوم، دو سوم و کاملاً باز بودن مورد بررسی قرار گرفت. با قرار دادن دریچه در هریک از این سه وضعیت، مقدار خروجی دانه در واحد زمان به داخل محفظه آسیاب ثبت شد و با انجام سه تکرار در هر وضعیت و با میانگین‌گیری، به کالیبره کردن دستگاه برای هر محصول پرداخته شد. نرخ تغذیه در سه حالت باز بودن دریچه‌ی زیر مخزن برای محصولات گندم، ذرت، سویا و جو در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱– ابعاد و مشخصات آسیاب چکشی

Table 1- Dimensions and specifications of hammer mill

مشخصات آسیاب **Mill properties**	مقدار عددی **Quantity**
تعداد صفحات حامل چکش‌ها Number of hammers plates	4-8
ابعاد چکش‌ها Dimensions of hammers	40×100 mm
ضخامت چکش‌ها Thickness of hammers	3 mm
تعداد چکش‌ها روی هر صفحه Number of hammers on each plate	3-6
فاصله‌ی متوالی چکش‌ها روی صفحه Distance between two consecutive hammers	75 mm
سرعت گردش محور آسیاب Rotational speed of mill shaft	2900 rpm
فاصله‌ی متوسط غربال تا نوک چکش‌ها Average distance between sieve and hammer tip	15 mm

اندازه‌گیری ظرفیت کاری آسیاب چکشی

به‌منظور اندازه‌گیری ظرفیت کاری آسیاب چکشی، طبق نقشه آزمایش‌ها با تعیین مقدار پارامترهای مستقل بر روی دستگاه برای هر آزمایش، زمان لازم جهت آسیاب محصولات ثبت گردید. مقدار محصول نهایی خرد شده در هر آزمایش را نیز وزن نموده و بر مدت زمان لازم برای آسیاب کردن تقسیم شد. مقدار دانه خرد شده (g) M_{xP} طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Pourazarang and Ziaulhagh, 2002).

$$M_{xp}=q.t \quad (۱)$$

که در آن: q ظرفیت کاری ماشین خردکن بر حسب $g\ s^{-1}$ و t مدت زمان خرد شدن بر حسب s است.

اندازه‌گیری درجه‌ی ریزی ذرات خرد شده

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌ها برای سنجش و ارزیابی کیفیت کار آسیاب، اندازه‌گیری درجه‌ی ریزی مواد خرد شده خروجی از آن هستند. برای تعیین ریزی مواد آسیاب شده استفاده از آنالیز الک مطرح می‌شود که برای آنالیزکردن خوراک، با مجموعه الک و دستگاه لرزاننده[4] مطابق جدول ۳ (استاندارد ASTM E-11-70 Part 41) ابعاد ذرات خروجی اندازه‌گیری شدند (Anonymous, 2004).

1- Feeder
2- Hammer
3- Screen
4- Shaker

جدول ۲- نرخ تغذیه در حالات مختلف دریچه مخزن

Table 2- Feed rate in different modes of tank valve

محصول Crop	نرخ تغذیه Feed rate ($g\ s^{-1}$)		
	یک سوم باز بودن دریچه 1/3 openness of gate	دو سوم باز بودن دریچه 2/3 openness of gate	کاملاً باز Full openness of gate
گندم Wheat	270.4	343.8	374.3
جو Barley	276.2	350.6	385.1
ذرت Corn	224.5	358.7	433.8
سویا Soybean	263.8	337.2	367.3

جدول ۳- مشخصات الک‌های مورد استفاده در آنالیز الک بر اساس استاندارد (ASTM E-11-70 Part 41) (Anonymous, 2004)

Table 3- Characteristics of the sieves used in sieve analysis according to standard (ASTM E-11-70 Part 41) (Anonymous, 2004)

شماره الک‌های استاندارد Standard sieves number	قطر سوراخ Diameter of sieve hole (mm)
3.8	8
4	4.75
8	3.35
14	1
28	0.5
48	0.3
100	0.106

برای تعیین میزان ریزی مواد خرد شده، g ۵۰۰ از نمونه‌ها را برداشته و در سری هفت‌تایی الک‌های مزبور ریخته شد و در ماشین لرزاننده به مدت ۳ دقیقه الک گردید. برای تعیین درجه ریزی بر اساس مدول ریزی، مواد خرد شده باقی‌مانده در هر الک توزین شده و درصد آنها مشخص شد. برای مجموعه هفت‌تایی الک‌ها به همراه تشتک، اعداد صفر تا ۷ به‌ترتیب برای تشتک تا بزرگ‌ترین اندازه الک تعیین شد. درصد مانده در هر الک در شماره اختصاصی الک (از صفر تا ۷) ضرب شد. مدول ریزی نمونه مواد خرد شده از تقسیم مجموع حاصل‌ضرب‌های به‌دست آمده الک‌های موجود، بر عدد ۱۰۰ مشخص شد (ASTM E-11-70 Part 41) (Anonymous, 2004).

استفاده از روش سطح پاسخ

در این پژوهش اثر متغیرهای مستقل شامل اندازه قطر سوراخ غربال (A)، رطوبت دانه (B)، نرخ تغذیه (C) و تعداد چکش (D) در سه سطح با استفاده از روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی با بیشترین تکرار در نقاط مرکزی طرح (۶ تکرار) به‌منظور بررسی تاثیر شرایط کاهش میزان درجه‌ی ریزی (بیشتر شدن خردشدگی) و افزایش ظرفیت کاری آسیاب و بهینه‌سازی فرآیند مذکور استفاده شد. در جدول ۴ متغیرهای مستقل فرآیند و مقادیر آن‌ها نشان داده شده است.

پس از وارد کردن محدوده متغیرهای مورد بررسی در محیط نرم‌افزار Design Expert 8.0.6 طرح آزمایش‌ها شامل ۳۰ آزمون برای هر محصول به‌دست آمد.

جدول ٤- مقادیر متغیرهای مستقل در سطوح مختلف آزمایش (طرح مرکب مرکزی، تعداد ۳۰ آزمایش)

Table 4- The values of independent variables at different test levels (central composite design, 30 experiments)

متغیرها Variables	سطح ۱- Level -1	سطح ۰ Level 0	سطح ۱ Level +1
سوراخ غربال Diameter of sieve hole	2	3.2	4.4
رطوبت دانه Grain moisture content	10	14	18
تعداد چکش Number of hammer	12	18	24
باز بودن موقعیت دریچه Openness situation of gate	1/3	2/3	1

مدل مورد استفاده در روش سطح پاسخ، عموماً رابطه‌ی درجه دوم می‌باشد (Myers and Montgomery, 1995). در روش سطح پاسخ برای هر متغیر وابسته مدلی تعریف می‌شود که آثار اصلی و متقابل فاکتورها را روی هر متغیر جداگانه بیان می‌کند. مدل‌سازی‌های ریاضی هر پاسخ به‌وسیله تجزیه‌ی رگرسیون خطی چندگانه، ارزیابی می‌شود. شروع مدل‌سازی با الگوی درجه دوم دربرگیرنده‌ی جملات اثر متقابل است. معادله کلی سطح پاسخ را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) نوشت.

$$y= \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum_{i<j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (۲)$$

که در آن: β_0، عرض از مبداء و β_i، β_{ii} و β_{ij} ضرایب رگرسیونی به‌ترتیب خطی، درجه دوم و اثر متقابل و X_i و X_j متغیرهای مستقل کدبندی شده و ε باقیمانده یا خطا هستند.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز آماری

نتایج حاصل از تجزیه واریانس اثر متغیرهای مستقل بر درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای محصولات گندم، ذرت و جو در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به دانه گندم نشان داد که دو فاکتور اندازه سوراخ غربال و تعداد چکش تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی درجه ریزی گندم دارند. به‌علاوه اثر درجه دو متغیرهای مستقل سوراخ غربال و رطوبت دانه بر روی درجه ریزی گندم نیز در سطح یک درصد معنی‌دار شد؛ اما فاکتورهای رطوبت دانه، نرخ تغذیه و کلیه‌ی اثرات متقابل معنی‌دار نشدند. برای ظرفیت کاری، هر چهار فاکتور سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر ظرفیت کاری دارند. هم‌چنین اثر متقابل اندازه سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و تعداد چکش در سطح یک درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل اندازه سوراخ غربال، رطوبت و نرخ تغذیه و هم‌چنین اثر متقابل اندازه سوراخ غربال، نرخ تغذیه و تعداد چکش در سطح ۵ درصد نیز معنی‌دار شد. مقادیر عدم تناسب (LOF) برای مدل‌های برازش شده درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای تمامی محصولات مورد مطالعه غیرمعنی‌دار شد. این پارامتر، مقدار پراکندگی داده‌ها حول مدل برازش شده را نشان می‌دهد؛ که در صورت غیرمعنی‌دار شدن آن می‌توان نتیجه گرفت که مدل برازش شده به‌خوبی با داده‌های آزمایش متناسب است و داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل انطباق خوبی با داده‌های آزمایش خواهند داشت.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر تعداد چکش، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و اندازه سوراخ غربال بر روی درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای گندم، ذرت و جو

Table 5- Fineness degree and mill capacity at different setting of hammer mill for wheat, corn and barley

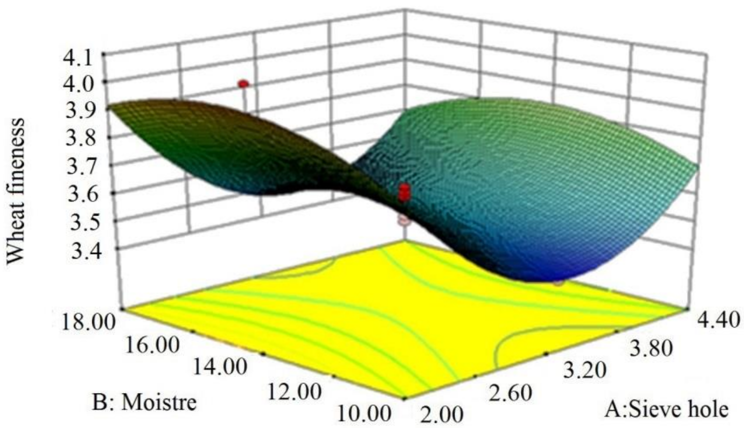
منابع تغییرات **Source of variance**	**میانگین مربعات برای گندم Mean squares for wheat**		**میانگین مربعات برای ذرت Mean squares for corn**		**میانگین مربعات برای جو Mean squares for barley**	
	ظرفیت کاری Working capacity	**درجه ریزی Fineness degree**	**ظرفیت کاری Working capacity**	**درجه ریزی Fineness degree**	**ظرفیت کاری Working capacity**	**درجه ریزی Fineness degree**
مدل Model	26.69**	0.034**	21.61**	0.056**	16.38*	0.077*
(سوراخ غربال) A (sieve hole)	25.752**	0.12**	21.69**	0.14**	20.06*	0.021 ns
(رطوبت دانه) B (grain moisture)	37.50**	0.013 ns	201.13**	0.48**	144.84**	0.77**
(نرخ تغذیه) C (feed rate)	23.23**	0.0043 ns	26.23**	0.00027 ns	6.76 ns	0.00045 ns
(تعداد چکش) D (number of hammer)	231.41**	0.042**	3.08 ns	0.0061 ns	0.29 ns	0.022 ns
A^2	5.60 ns	0.29**	4.38 ns	0.064**	47.11**	0.074*
B^2	4.83 ns	0.044**	0.74 ns	0.00086 ns	0.69 ns	0.031 ns
D^2	2.31 ns	0.014 ns	5.56 ns	0.012 ns	27.13*	0.0011 ns
AB	85.75**	0.012 ns	20.98**	0.086**	23.96*	0.080*
BC	0.036 ns	0.0085 ns	30.75**	0.00075 ns	7.37 ns	0.00051 ns
BD	40.77**	0.0045 ns	6.33 ns	0.020*	0.081 ns	0.000056 ns
CD	4.60 ns	0.0045 ns	9.99*	0.0014 ns	0.090 ns	0.0000062 ns
ABC	18.282*	0.0022 ns	0.27 ns	0.00015 ns	5.50 ns	0.00051 ns
ACD	12.74*	0.0062 ns	0.046 ns	0.006 ns	6.25 ns	0.00031 ns
BCD	1.17 ns	0.0075 ns	12.92*	0.0018 ns	0.0042 ns	0.00075 ns
عدم تناسب Lack of fit (LOF)	1.20 ns	0.034 ns	1.04 ns	0.0008 ns	0.74 ns	0.0059 ns
خطا Error	1.90	0.047	1.43	0.0028	3.31	0.0087

ns: عدم معنی‌داری، * و **: به‌ترتیب معنی‌داری در سطح ۵٪ و ۱٪

**: Significant at level 1% , *: Significant at level 5% , ns: Nonsignificant

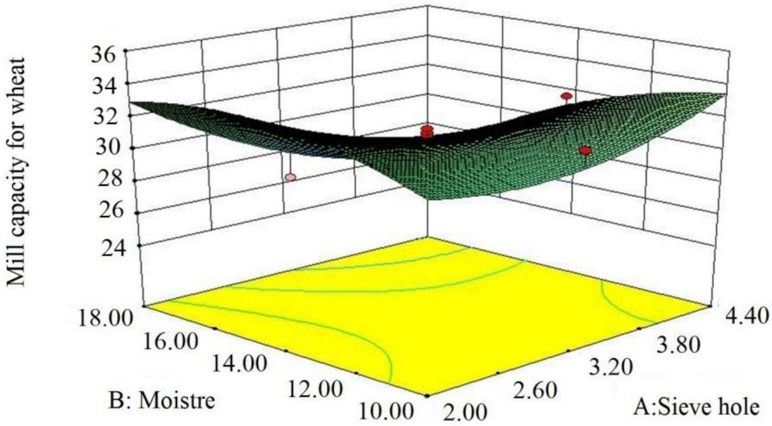
با توجه به نتایج حاصل از تجزیه واریانس برای ذرت، می‌توان این‌گونه بیان کرد که دو فاکتور اندازه سوراخ غربال و رطوبت دانه تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی درجه ریزی ذرت دارند (جدول ۵). هم‌چنین از بین اثرات متقابل نیز، اثر متقابل سوراخ غربال و رطوبت در سطح یک درصد و اثر متقابل رطوبت دانه و تعداد چکش در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. به‌علاوه اثر درجه دو متغیر مستقل سوراخ غربال بر روی درجه ریزی ذرت نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین می‌توان دریافت که سه فاکتور سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه تأثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر ظرفیت کاری دارند. به‌علاوه اثرات متقابل سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و نرخ تغذیه در سطح یک درصد و اثر متقابل نرخ تغذیه و تعداد چکش و هم‌چنین اثر متقابل رطوبت و نرخ تغذیه و تعداد چکش در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که تنها فاکتور رطوبت دانه تاثیر معنی‌داری در سطح یک درصد بر روی درجه ریزی جو دارد. اثر متقابل سوراخ غربال و رطوبت دانه و همچنین اثر درجه دوم سوراخ غربال نیز در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. فاکتورهای رطوبت دانه در سطح یک درصد و سوراخ غربال در سطح ۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر ظرفیت کاری دستگاه دارد. هم‌چنین اثر درجه دوم سوراخ غربال در سطح یک درصد، اثر درجه دوم تعداد چکش و اثر متقابل اندازه سوراخ غربال و رطوبت دانه در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد.

به‌منظور بررسی اثر متغیرهای مستقل بر درجه ریزی و ظرفیت کاری برای محصولات مختلف، می‌توان از نمودارهای رویه سطح تأثیر متقابل متغیرهای مستقل بر روی متغیر وابسته استفاده کرد. در شکل ۲ شیب بیشتر تغییرات عامل اندازه سوراخ غربال بیان‌گر اثر بیشتر این عامل بر درجه ریزی گندم است. این یافته با نتایج تعدادی از محققین از جمله Murphy *et al.* (2009) که در تحقیق خود افزایش بازده خوراک برای دانه‌های گندم و سورگوم را در اثر استفاده از اندازه غربال کوچک‌تر در کیفیت بالای رژیم‌های غذایی گزارش نمودند، هم‌خوانی دارد. همچنین با توجه به شکل ۲، با افزایش اندازه سوراخ غربال، درجه ریزی گندم روند یکنواختی ندارد. افزایش درجه ریزی گندم با افزایش اندازه سوراخ غربال از سطح دوم به سوم را می‌توان ناشی از فرصت بیشتر دانه‌های سالم برای عبور از اندازه سوراخ غربال‌های درشت دانست که با نتایج تحقیق سایر محققان از جمله Adapa *et al.* (2010) و Tavakoli *et al.* (2009) مطابقت دارد. بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش اندازه سوراخ غربال، ظرفیت کاری دستگاه کاهش پیدا کرده است که بیشترین ظرفیت کاری در سطح اول سوراخ غربال (۲ mm) و کمترین مقدار آن در سطح سوم سوراخ غربال (۴/۴ mm) رخ داده است. این نتایج به‌دست آمده با یافته‌های Mani *et al.* (2006) و Rezvani *et al.* (2013) مطابقت دارد.



شکل ۲– تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی دانه گندم در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 2. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the wheat fineness degree in the second level of feed rate and 18 hammers

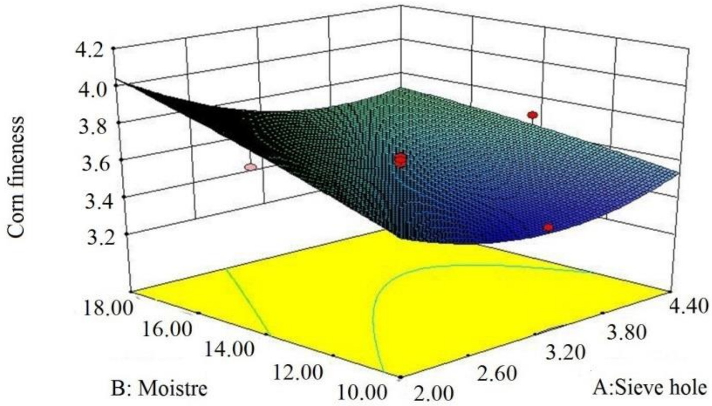


شکل ۳- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه گندم در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 3. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the mill working capacity for wheat in the second level of feed rate and 18 hammers

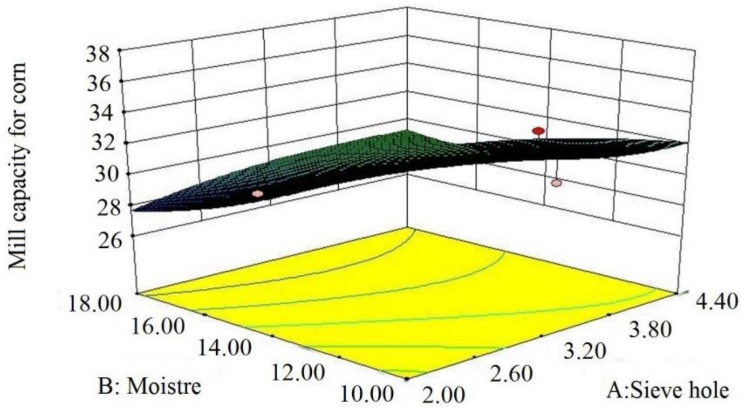
بررسی شکل ۲ نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت دانه، درجه ریزی گندم حالت یکنواختی ندارد. کمترین درجه ریزی مربوط به شطح اول رطوبت (۱۰ درصد) است و بیشترین مقدار در سطح دوم رطوبت (۱۴ درصد) اتفاق افتاده است. دلیل این امر را می‌توان ناشی از بیشتر شدن نیروی چسبندگی و کششی با افزایش رطوبت در دانه دانست که نسبت به حالت رطوبت کمتر، تردی و شکنندگی کمتری دارد. این یافته را می‌توان مطابق نتایج تحقیق Vaezizadeh and Ghaznfari-Moghaddam (2008) دانست که نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد کاهش رطوبت با افزایش میزان خرد شدگی همراه بود. اما برای ظرفیت کاری، با توجه به شکل ۳ می‌توان چنین نتیجه گرفت که با افزایش درصد رطوبت دانه گندم، ظرفیت کاری دستگاه کاهش خواهد یافت به‌طوری‌که در سطح سوم رطوبت (۱۸ درصد) پایین‌ترین ظرفیت کاری دستگاه رخ داده است. چراکه دانه با درصد رطوبت بیشتر، فرصت تخلیه کمتری را نسبت حالت خشک دارد و رطوبت مانع از خزش و روان بودن جریان دانه به داخل محفظه آسیاب است. گاهی اوقات در هنگام آزمایش جمع‌شدگی مقدار زیادی دانه سالم در داخل دهانه مخزن مشاهده می‌شد. این یافته با نتایج تحقیق Miao *et al.* (2011) هم‌خوانی دارد.

مطابق شکل‌های ۴ و ۵، اثر رطوبت دانه بر درجه ریزی و ظرفیت کاری ذرت نسبت به بقیه پارامترها بیشتر است. تاثیر سایر متغیرها بر درجه ریزی ذرت همانند نتایج درجه ریزی گندم گزارش شد. تنها اختلاف در عامل رطوبت نسبت به نتیجه گندم مشاهده شد؛ به این صورت که با افزایش رطوبت دانه، درجه ریزی ذرت روند خطی دارد؛ یعنی با افزایش رطوبت، درجه ریزی نیز بیشتر شده است به‌طوری‌که سطوح اول و سوم رطوبت (۱۰ و ۱۸ درصد) به‌ترتیب پایین‌ترین و بالاترین درجه ریزی را دارند. دلیل این امر را می‌توان ناشی از بیشتر شدن حالت خمیری محصول با افزایش رطوبت در دانه دانست که نسبت به حالت خشک، تردی و شکنندگی کمتری داردکه این نتیجه با یافته‌های Jindal and Austin (1976) هم‌خوانی دارد. هم‌چنین نتایج بیشتر تحقیقات نشان داده‌اند که برای تولید خوراک پلت شده با هدف افزایش ریزی ذرت آسیاب شده، از رطوبت ۱۰ درصد دانه استفاده شود (El Shal *et al.*, 2010). مطابق شکل ۵، نتایج به‌دست آمده از اثر متغیرها بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه ذرت همانند نتایج مربوط به ظرفیت کاری برای گندم گزارش شد. نتایج حاضر در مورد عامل اندازه سوراخ غربال برای ظرفیت کاری ذرت با یافته‌های Reece *et al.* (1986) و Martin (1985) مطابقت دارد.



شکل ٤- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی ذرت در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 4. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the corn fineness degree in the second level of feed rate and 18 hammers

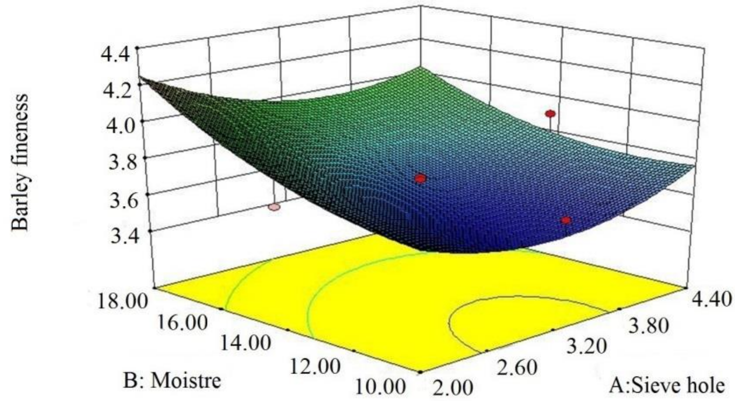


شکل ٥- تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه ذرت در سطح دوم معادل نرخ تغذیه و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 5. Interaction between moisture content and sieve hole diameter on the mill working capacity for corn in the second level of feed rate and 18 hammers

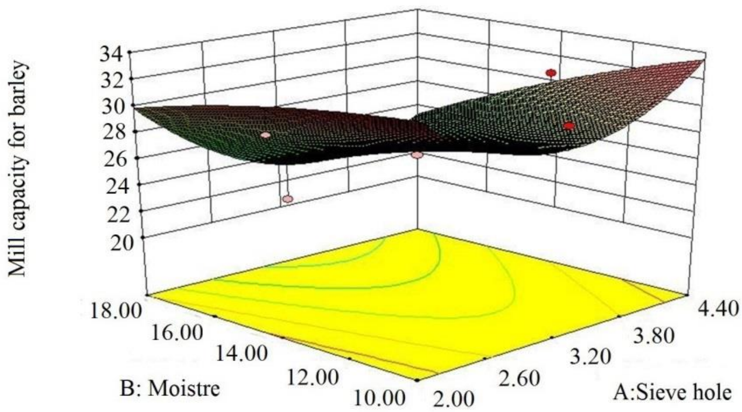
نتایج تاثیر متغیرهای اندازه سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی جو شبیه به نتایج درجه ریزی گندم و ذرت گزارش شد (شکل ۶). نتایج حاضر با یافته‌های Al-Rabadi (2013) بر روی پردازش پارامترها از جمله تولید خروجی، انرژی مصرفی و میانگین اندازه ذرات جو خرد شده تحت تاثیر دو سطح اندازه غربال آسیاب چکشی مطابقت دارد.

طبق شکل ۶ نتایج مربوط به عامل رطوبت شبیه به نتایج مربوط به پارامترهای گندم و ذرت به‌دست آمد. تفاوت در پارامتر اندازه سوراخ غربال نسبت به نتایج محصولات قبلی مشاهده شد. با توجه به شکل ۷ می‌توان گفت که با افزایش اندازه سوراخ غربال، ظرفیت کاری دستگاه روند صعودی-نزولی پیدا کرده است که این یافته را می‌توان با نتایج تحقیق Manlu *et al.* (2006) مطابق دانست.



شکل ٦– تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر درجه ریزی جو در نرخ تغذیه سطح ۲ و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 6. Interaction between the moisture content and sieve hole diameter on the barley fineness degree in the second level of feed rate and 18 hammers



شکل ۷– تأثیر متقابل سوراخ غربال و رطوبت بر ظرفیت کاری دستگاه برای دانه جو در نرخ تغذیه سطح ۲ و تعداد چکش ۱۸ عدد

Fig. 7. Interaction between the moisture content and sieve hole diameter on the working capacity of the mill for barley in the second level of feed rate and 18 hammers

سهم تأثیر هر متغیر در پارامترهای مورد بررسی، که از نسبت مجموع مربعات تصحیح شده هر متغیر به مجموع مربعات تصحیح شده کل منابع تغییر حاصل می‌شود، به تفکیک هر محصول در جدول ۶ ارائه شد. لازم به ذکر است چون عوامل دیگری همچون اثرات متقابل متغیرها و نیز توان دوم متغیرهای مستقل در مدل وجود دارند، مجموع سهم تأثیر متغیرها برابر با ۱۰۰٪ نمی‌شود. همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تعداد چکش بیشترین تأثیر را در ظرفیت کاری آسیاب چکشی در محصول گندم دارد و سایر عوامل مورد بررسی با اختلاف زیاد از این پارامتر قرار دارند. اندازه سوراخ غربال نیز مؤثرترین عامل بر درجه ریزی گندم نیز می‌باشد و سایر عوامل مورد مطالعه تأثیر به مراتب کمتری را نشان می‌دهند. در مورد محصولات ذرت و جو مؤثرترین عامل در ظرفیت کاری آسیاب چکشی و نیز درجه ریزی ذرات، رطوبت دانه است که سهم تاثیر آن اختلاف زیادی با سایر عوامل مورد بررسی دارد که این نتیجه خود نشان‌دهنده اهمیت بالای انتخاب صحیح رطوبت محصول در عملکرد آسیاب چکشی است.

مدل‌های رگرسیونی برای بیان رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته برای پیش‌بینی درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای محصولات گندم، ذرت و جو به همراه ضرایب تبیین آنها در جدول ۷ ارائه شده‌اند.

جدول ٦- سهم تاثیر متغیرهای مستقل در پارامترهای مورد بررسی در آزمایش‌ها برای محصولات گندم، ذرت و جو

Table 6- Percentage of contribution of independent variables on investigated parameters for wheat, corn and barley

متغیر مستقل Independent variable	سهم تأثیر برای گندم (٪) Mean squares for wheat (%)		سهم تأثیر برای ذرت (٪) Mean squares for corn (%)		سهم تأثیر برای جو (٪) Mean squares for barley (%)	
	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree	ظرفیت کاری Working capacity	درجه ریزی Fineness degree
A (سوراخ غربال) A (sieve hole)	4.89	17.64	5.10	12.84	5.82	1.35
B (رطوبت دانه) B (grain moisture)	7.12	1.91	47.34	44.03	42.07	49.67
C (نرخ تغذیه) C (feed rate)	4.41	0.63	6.17	0.02	1.96	0.03
D (تعداد چکش) D (number of hammer)	43.99	6.17	0.72	0.56	0.08	1.42

جدول ۷- مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی درجه ریزی و ظرفیت کاری آسیاب چکشی برای محصولات گندم، ذرت و جو

Table 7- Regression models to predict the fineness degree and mill capacity for wheat, corn and barley

پارامتر Parameter	مدل رگرسیونی Regression model	ضریب تبیین R-Squared	ضریب تبیین تصحیح شده Adjusted R-Squared
درجه ریزی گندم Fineness degree of wheat	$F.d_{wheat} = +3.58 - 0.083A - 0.048D + 0.32A^2 - 0.15B^2$	0.9230	0.8511
ظرفیت کاری برای گندم Working capacity for wheat	$Ca_{wheat} = +31.03 - 1.20A - 1.44B + 1.14C + 3.59D - 2.31AB - 1.60BD - 1.07ABC - 0.89ACD$	0.9372	0.8699
درجه ریزی ذرت Fineness degree of corn	$F.d_{Corn} = +3.59 - 0.088A + 0.16B - 0.073AB + 0.036BD + 0.20A^2$	0.9866	0.9818
ظرفیت کاری برای ذرت Working capacity for corn	$Ca_{Corn} = +32.39 - 1.10A - 3.34B + 1.21C + 1.15AB - 1.39BC + 0.79CD - 0.90BCD$	0.9289	0.8625
درجه ریزی جو Fineness degree of barley	$F.d_{Barley} = +3.95 + 0.026B - 0.026AB - 0.18A^2$	0.8565	0.8047
ظرفیت کاری برای جو Working capacity for barley	$Ca_{Barley} = +26.45 + 1.29A - 0.71B + 1.19AB + 0.33BD - 0.87A^2 + 2.70D^2$	0.9740	0.9246

در جدول ۷، A- اندازه سوراخ غربال (mm)، B- رطوبت دانه (%)، C- نرخ تغذیه ($g\ s^{-1}$)، D- تعداد چکش، $F.d_{wheat}$- درجه ریزی گندم (mm)، Ca_{wheat}- ظرفیت کاری دستگاه برای دانه گندم ($g\ s^{-1}$)، $F.d_{Corn}$ درجه ریزی ذرت (mm)، Ca_{Corn} ظرفیت کاری دستگاه برای دانه ذرت ($g\ s^{-1}$)، $F.d_{Barley}$ درجه ریزی جو (mm) و Ca_{Barley} ظرفیت کاری دستگاه برای دانه جو ($g\ s^{-1}$) می‌باشد.

علاوه بر محصولات فوق‌الذکر آزمایش‌ها در مورد محصول سویا نیز انجام شد ولی بر اساس تجزیه و تحلیل صورت گرفته مربوط به درجه ریزی و ظرفیت‌کاری دستگاه برای دانه سویا مشخص شد که ضریب تبیین تصحیح شده (R_{adj}^2) محاسبه شده برای دو صفت مذکور بسیار پایین بوده که مقدار آن‌ها به‌ترتیب برابر ۰/۲۰ و ۰/۲۶ است که این ارقام از نظر آماری نشان‌گر دقت پایین بوده و نتایج حاصل از آن قابل اعتماد نمی‌باشد. ضریب تبیین نشان‌دهنده قدرت توصیف تغییرات هرکدام از متغیرهای وابسته به‌وسیله متغیر مستقل است. ضریب تبیین بالا در معادلات نشان‌دهنده‌ی برازش خوب مدل محاسباتی است به طوری که مدلی که دارای بیشترین مقادیر ضریب تبیین باشد دارای قدرت پیش‌بینی بالا و دقت بیشتری خواهد بود (Badwaik *et al.*, 2012). در توجیه پایین بودن ضریب تبیین تصحیح شده (R_{adj}^2) برای دانه سویا می‌توان این‌گونه عنوان کرد که در حالت عادی (بدون داشتن رطوبت) انعطاف‌پذیری و نرمی بالایی نسبت به دانه‌های گندم، ذرت و جو دارد؛ یعنی با برخورد کمترین ضربه، سویا حالت آردی شکل به خود گرفته و آسیاب خواهد شد. در طول عملیات مرطوب کردن سویا در آزمایش‌های صورت گرفته، مشاهده شد که عمل مرطوب کردن سویا، آن را به راحتی و حتی قبل

از تغذیه و برخورد ضربه‌های چکش، به شکل آرد و حالت گلوله‌ای درآورده است. این امر هنگام تغذیه محصول به داخل مخزن آسیاب عملاً مشاهده می‌شد.

بهینه‌سازی مقادیر پارامترها

مقادیر بهینه اندازه سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش در محدوده‌ی تعریف شده، برای درجه ریزی و ظرفیت کاری دستگاه آسیاب چکشی، برای دانه‌های گندم، ذرت و جو مشخص شد. با توجه به شرایط تعیین شده، بهترین جواب‌ها مطابق جدول ۸ به‌دست آمد.

جدول ۸- شرایط بهینه برای به حداقل رساندن درجه ریزی محصولات و حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب چکشی

Table 8 - Optimal conditions for minimizing fineness degree of crops and maximizing mill working capacity

شرط بهینه‌سازی Optimization term	قطر سوراخ غربال Diameter of sieve hole	رطوبت دانه Moisture content	تعداد چکش Number of hammers	نرخ تغذیه Feed rate	خروجی بهینه Optimal output
حداقل‌سازی درجه ریزی گندم Minimizing fineness degree of wheat	3.2	10	18	343.8	3.42
حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب برای گندم Maximizing mill capacity for wheat	4.4	10	24	374.3	41.27
حداقل‌سازی درجه ریزی ذرت Minimizing fineness degree of corn	3.2	10	18	358.7	3.43
حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب برای ذرت Maximizing mill capacity for corn	2	10	24	433.8	45.12
حداقل‌سازی درجه ریزی جو Minimizing fineness degree of barley	3.2	14	24	350.6	3.60
حداکثرسازی ظرفیت کاری آسیاب برای جو Maximizing mill capacity for barley	4.4	10	18	385.1	32.43

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، روش سطح پاسخ با طرح مرکب مرکزی به‌منظور تعیین شرایط بهینه‌ی چهار متغیر (اندازه سوراخ غربال، رطوبت دانه، نرخ تغذیه و تعداد چکش) در سه سطح در فرآیند آسیاب کردن به‌وسیله آسیاب چکشی برای تولید خوراک طیور با هدف دستیابی به حداقل درجه‌ی ریزی (بیشتر خرد شدن مواد) و حداکثر ظرفیت کاری آسیاب به‌کار گرفته شد. نتایج به‌دست آمده حاکی از این بود که به‌طور کلی با افزایش رطوبت، ظرفیت دستگاه و درجه ریزی محصولات کاهش پیدا کرده و به حداقل مقدار خود در بالاترین سطح درصد رطوبت می‌رسد. به‌طور کلی با افزایش قطر سوراخ غربال، ظرفیت کاری آسیاب و درجه ریزی گندم و ذرت آسیاب شده افزایش می‌یابند. با افزایش نرخ تغذیه و افزایش تعداد چکش، به‌ترتیب ظرفیت کاری آسیاب افزایش و درجه ریزی محصول کاهش می‌یابد. برای ظرفیت کاری آسیاب گندم، اثر متقابل سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و تعداد چکش در سطح یک درصد معنی‌دار بود. برای ذرت به‌ترتیب برای درجه ریزی، سوراخ غربال و رطوبت و برای ظرفیت کاری، سوراخ غربال و رطوبت، رطوبت و نرخ تغذیه در سطح یک درصد معنی‌دار بود. برای درجه ریزی جو، سوراخ غربال و رطوبت در سطح یک درصد معنی‌دار بود. دانه سویا به دلیل داشتن ساختار ضعیف و بافت نرم، به سرعت نسبت به افزایش رطوبت عکس‌العمل نشان داده و سریعاً به آرد تبدیل می‌شد. این عامل باعث شد تا ضریب تعیین بسیار پایین در نتیجه آزمایش‌ها از خود نشان داده و نتایج قابل قبولی به‌دست ندهد. مدل‌های رگرسیونی درجه دوم به‌دست آمده به‌خوبی توانستند با ضریب اطمینان بالای ۹۰٪ رابطه‌ی بین خروجی‌های مورد نظر و متغیرهای مستقل را محاسبه کنند. شرایط عملیاتی بهینه‌سازی کار آسیاب چکشی با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی عددی بررسی شد و تعیین سطوح بهینه متغیرهای مستقل در فرآیند آسیاب کردن و تخمین نقطه عملکرد بهینه درجه ریزی و ظرفیت کاری در بخش حل به‌دست آمد. مدل ارائه شده برای پیش‌بینی مقادیر متغیرهای وابسته نتایج بسیار نزدیکی با یافته‌های آزمایشی به‌دست آمده دارد. با توجه به تأثیر زیاد رطوبت بر خروجی، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی محتوای رطوبتی محصولات به‌صورت بازه‌ای در نظر گرفته شود. هم‌چنین ارزیابی مقایسه‌ای بین انواع آسیاب‌های متداول تولید خوراک صورت گیرد تا از نظر اقتصادی و کارایی بهترین آسیاب مشخص شود و نتایج این تحقیق به‌صورت کاربردی در اختیار تولیدکنندگان خوراک طیور قرار گیرد.

References

1. Adapa, P. H., L. Tabil, and G. Schoenau. 2010. Physical and frictional properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw grinds. Powder Technology 201: 230-241.

2. Al-Rabadi, G. J. 2013. The effect of hammer mill screen size on processing parameters and starch enrichment in milled barley. Jordan Journal of Agricultural Sciences 2: 162-169.
3. Anonymous. 2004. ASTM E-11-70, US-American Standard Specification (sieve No.).
4. Aslan, N. 2007. Application of response surface methodology and central composite rotatable design for modeling the influence of some operating variables of a multi-gravity separator for chromite concentration. Powder Technology 86: 769-776.
5. Badwaik, L. S., K. Prasad, and S. C. Deka. 2012. Optimization of extraction conditions by response surface methodology for preparing partially defatted peanut. International Food Research Journal 19 (1): 341-346.
6. Bitra, V. S. P., A. R.Womac, N. Chevanan, P. I. Miu, C. Igathinathane, S. Sokhansanj, and D. R. Smith. 2009a. Mathematical model parameters for describing the particle size spectra of knife-milled corn stover. Biosystem Engineering 104 (3): 369-383.
7. Bitra, V. S. P., A. R.Womac, N. Chevanan, P. I. Miu, C. Igathinathane, S. Sokhansanj, and D. R. Smith. 2009b. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass, wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distributions. Powder Technology 193: 32-45.
8. Dabbour, M. I., A. Bahnasawy, S. Ali, and Z. El-Haddad. 2015. Grinding parameters and their effects on the quality of corn for feed processing. Food Processing and Technology 6 (9): 1-7.
9. El Shal, M. S., M. A. Tawfik, A. M. El Shal, and K. A. Metwally. 2010. Study the effect of some operational factors on hammer mill. Farm Machinery and Power 27 (1): 54-74.
10. Endoh, H. 1993. Estimation of motor power output for crushing by screen hammer mills. Powder Technology 40: 71-77.
11. Ghasemi, Y., M. H. Kianmehr, and B. Azadegan. 2015. Effect of compost fertilizer granulation parameters using response surface method. Journal of Agricultural Machinery 5 (1): 191-198. (In Farsi).
12. Ghorbani, Z., A. A. Masoumi, and A. Hemmat. 2010. Specific energy consumption for reducing the size of alfalfa chops using a hammer mill. Biosystems Engineering 105: 34-40.
13. Giri, S. K., and S. Prasad. 2007. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. Journal of Food Engineering 78 (2): 512-521.
14. Islam, M. N. 1988. Size distribution analysis of ground wheat by hammer mill. Powder Technology 54 (4): 235-241.
15. Jindal, V. K., and L. G. Austin. 1976. The kinetics of hammer milling maize. Powder Technology 14 (1): 35-39.
16. Kermanshahi, H., A. Attar, A. Abbassipour, and A. Bayat. 2014. A Comprehensive Guide to the Technology and Processing of Animal, Poultry and Aquatic Feed. Scientific Research Department of Hezareh Novin Co., pp. 276, Mashhad. (In Farsi).
17. Kiani, S. 2006. Animal Husbandry. 2nd Edition, Daneshvaran Publication, pp. 295, Tehran. (In Farsi).
18. Mani, S., L. G. Tabil, and S. Sokhansang. 2006. Specific energy requirement for compaction corn stover. Bioresource Technology 97: 1420-1426.
19. Manlu, Y. U., A. R. Womac, P. I. Miu, C. Igathinathance, I. Sokhansanj, and S. Narayan. 2006. Direct energy measurement system for rotary biomass grinder-hammer mill. ASABE Annual International Meeting. Convention Center Portland, Oregon. Paper No: 066217.
20. Martin, S. A. 1985. Comparison of hammermill and roller mill grinding and the effect of grain particle size on mixing and pelleting master's thesis. Department of Grain Science and Industry, Kansas State University.
21. Miao, Z., T. E. Grift, A. C. Hansen, and K. C. Ting. 2011. Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. Industrial Crops and Products 33: 504-513.
22. Murphy, A., C. Collins, A. Philpotts, A. Bunyan, and D. Henman. 2009. Influence of hammer mill screen size and grain source (wheat or sorghum) on the growth performance of male grower pigs. Report prepared for the Co-operative Research Centre for an Internationally Competitive Pork Industry. Established and supported. http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download.
23. Pishkar, J. 2000. Application and Service of Dairy Machines. Institute for Applied Higher Education in Tehran, pp. 152, Tehran. (In Farsi).
24. Pourazarang, H., and H. R. Ziaulhagh. 2002. Units Operation in Agricultural Products Processing. 1st Edition, Ferdowsi University Press, pp. 532, Mashhad. (In Farsi).
25. Reece, F. N., B. D. Lott, and J. W. Deaton. 1986. Effects of hammer mill screen size on ground corn particle size, pellet durability, and broiler performance. Poultry Science 65 (7): 1257-1261.
26. Rezvani, Z., Gh. Chegini, A. Arabhosseini, M. H. Kianmehr, and M. R. Asadi. 2013. Determining the specific energy consumption for grinding rice straw with a hammer mill. Journal of Automotive and Applied Mechnics 1 (1): 10-14.
27. Rouissi, T., A. Mahmoudi, R. D. Tyagi, S. K. Brar, D. Vost, and R. Y. Surampalli. 2007. Optimisation of spray drying by response surface methodology for the production of Sinorhizobium meliloti powder formulation by using starch industry wastewater. Biosystems Engineering 114 (3): 334-343.

28. Tavakoli, H., S. S. Mohtasebi, A. Jafari, and D. Mahdavinejad. 2009. Power requirement for particle size reduction of wheat straw as a function of straw threshing unit parameters. Australian Journal of Crop Science 3 (4): 231-236.
29. Tumuluru, J. S., L. G. Tabil, Y. Song, K. L. Iroba, and V. Meda. 2014. Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws. Biomass and Bioenergy 60: 58-67.
30. Vaezizadeh, M., and A. Ghaznfari-Moghaddam. 2008. Effect of adding moisture and storage time on the size of milled wheat particles. 5th National Congress on Agricultural Machinery and Mechanization, Mashhad, Iran. (In Farsi).

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 187-200

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۲۰۰-۱۸۷

Modeling and Optimization of the Grinding Cereals to Produce Poultry Feed in the Hammer Mill using Response Surface Method (RSM)

Z. Zibahoosh[1], J. Khodaei[2*], S. Zareei[2]

Received: 08-05-2018
Accepted: 25-08-2018

Introduction: The most costly part of poultry breeding is feeding. Due to the noticeable developments in animal husbandry and agricultural sectors, it is necessary to use the mechanized methods to reduce the casualties, increase the productivity as well as reduce the time and cost in each of these sectors. Reducing the particle size is one of the ways to process cereals which improves the mixing and also the nutritional value of the feed and the quality of the pellet feed. Optimizing the performance of hammer mill with the aim of reducing the size of different materials for poultry feed, would be very beneficial for obtaining the minimum cost of food, maximum quality and capacity. The main objective of this research was to optimize the operational variables, including sieve size, grain moisture content, feed rate and the number of hammers, each of them at three levels, on a hammer mill during the process of poultry food production from wheat, corn, barley and soybean grains.

Materials and Methods: The seeds used in experiments were wheat (Azar2 variety), corn (Brazilian variety), soybean (Danpars variety) and barley (Aras variety). A laboratory hammer mill was used to perform experiments. The treatments including sieve diameter (2, 2.3and 4.4 mm), grain moisture content (10, 14 and 18%), seed input rate to milling compartments (one-third, two-thirds and fully openness of tank gate) and the number of hammer (12, 18 and 24) were investigated. In order to measure the working capacity of the hammer mill, the required time for milling was recorded. The amount of final milled crop in each experiment was weighed and divided into the needed time for milling. Sieve analysis was used to determine the distribution and dispersion of the milled material which works according to the standard of ASTM E-11-70 Part 41 (Anonymous, 2004). In this study, the effects of input variables were investigated using the response surface method focusing on the central composite design approach to optimize the fineness degree and working capacity of the mill. The Design Expert 8.0.6 software was applied for statistical analysis, modeling and optimization.

Results and Discussion: The results indicated that sieve size and the number of hammers have been affected by the fineness degree of wheat grains, significantly. In addition, all four factors and interaction effects between sieve size and moisture content and also moisture content and number of hammers influential working capacity at the significant level of 1%. In the case of corn, the influence of moisture content and its interaction with sieve size on grain fineness, and the effect of sieve size, moisture content, feed rate and interactions between sieve size and moisture content and moisture content and feed rate of working capacity were significant at the level of 1%. For barley, moisture content at the level of 1% and interaction between sieve size and moisture content at the probability level of 5% were effective on barley fineness degree. Meanwhile, the moisture content at the level of 1% and sieve size and its interaction with moisture content at the level of 5% influenced working capacity, significantly. Soybeans were not able to respond the required moisture level for the experiments due to their soft and brittle texture, whereas unreliable results were obtained by changing its moisture levels. The best size of sieve holes, grain moisture content, feed rate and the number of hammers were determined to minimize the fineness degree and maximize the working capacity of the hammer mill.

Conclusions: In this research, the response surface method considering a central composite design was used to optimize the operational variables of a hammer mill, including sieve hole size, grain moisture, feed rate and the number of hammer to produce poultry feed with the aim of achieving a minimum fineness degree (more grain crushing) and maximum milling capacity. The results of variance analysis were presented for wheat, corn, barley and soybean. Regression models could represent the relationship between the independent variables and the outputs with high confidence coefficient, and the best values of input variables were determined to optimize grinding operation.

Keywords: Fineness, Hammer mill, Milling, Optimization, Work capacity

1- MSc. Graduated Student, Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: j.khodaei@uok.ac.ir)